二段充てん法による内歯車の成形*

沢木 洋三^{*1}, 吉田 始^{*1}, 泉澤 正郎^{*2}

Shaping of Internal Gear by Two-Step Cold Extrusion

Yozo SAWAKI, Hajime YOSHIDA and Masaro IZUMISAWA

Shaping of an internal gear by two-step extrusion is proposed. That is, a mandrel, having involute teeth and its diameter increased two steps, was used to expand the inner diameter of the workpiece. The specifications of gears formed were as follows: module $m=1.0\sim1.75$ mm, pressure angle $\alpha=20^\circ$, number of teeth $Z=16\sim11$, whole tooth depth $h=2.00\sim2.25$ module. The material used was a S 15 C steel with phosphate coating as a lubricant. It is shown that the tooth depth of the first expanding part of the mandrel greatly affects the formation of the complete toothed gear. It is also shown that the reduction of area of only 9.5% can be shaped and the highest values of mean compressive stress on the punch and the stepped mandrel are 350 MPa and 650 MPa, respectively, which are far below the strengths of these die materials.

Key Words: Extruding, Internal Gear, Complete Tooth, Reduction of Area, Carbon Steel, Stepped Mandrel

1. ま え が き

押出し成形法は、試料素材の逃げが常に確保された状態での成形であるために、型に負荷される面圧(荷重)を、低く抑えることが可能である。また、連続的に成形ができることも、切削除去加工等に比べて、有利な点と考えられる。このほか、成形された歯は、加工硬化を受けた状態となることや、パニシ加工状態となり、表面の粗さが改善することなど多くの利点を有する。

このような点に注目して、著者らは、これまで歯車の冷間押出し成形に関する研究⁽¹⁾⁽²⁾を行ってきた。その結果、低炭素肌焼き鋼(S 15 C, SCM 415)および中炭素鋼(S 45 C)などの試料を用いて、平歯車、偏心平歯車⁽³⁾およびはずば歯車⁽⁴⁾の成形も可能であることなどを明らかにした。

一方、内径を広げるマンドレルと試料の外側を拘束するコンテナを組合せた型装置によってインナスプラインの押出し成形が可能であること、さらに内歯車の成形も可能となりつつあることを報告⁽⁵⁾した。しかし、充てんした成形品を得るためには断面減少率を30%

程度とすることが必要であり、成形に要する荷重が比較的大きいことが解決すべき点であった。

そこで、本研究は、この点を改善すべく内径を段階的に拡張する成形法について実験を試みたものである。その結果、この方法が、低い面圧で充てんされた内歯車を成形する手法として有効であることが明らかにされたので、これを二段充てん法として提案する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置および対象とした内歯車諸元 実験装置の概要を図1に示す。図の中心線より左側は長さ l_0 の円筒状試料4(これを先行試料と呼ぶ)を挿入しただけの加工前の状態である。右側はこの試料4をパンチ3により一定量押出した後、次の試料5(後続試料)を挿入した状態を示している。1は試料の内径を段階的に拡張させるマンドレルである。また2は試料外周部の変形を拘束するためのコンテナである。

これらマンドレル、パンチおよびコンテナの材質はJIS-SKD 11で、機械加工後熱処理、研削を施し、さらに必要部分にはラッピング仕上げを行った。これらの表面粗さは最大高さ粗さで $2\mu\text{m}$ 程度であった。

対象とした内歯車の諸元を表1に、マンドレルの寸法形状を図2に示す。図2のように、第1拡張部(I)

* 原稿受付 平成5年11月18日。

^{*1} 正員、静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)。^{*2} 正員、元：静岡大学 (自宅：〒980 仙台市青葉区花壇5-8)。

表 1 対象とした内歯車の諸元

m	mm	1.0	1.25	1.5	1.75
Z		14	16	13	11
h	mm	2.0	2.5	3.375	3.5
χ		+0.75	+0.85	+0.5	+0.607
d_k	mm	17	24	24	24
d_s	mm	12	18	16	18

m : Module Z : Number of teeth h : Whole depth
 χ : Addendum modification coefficient
 d_k : Tip diameter d_s : Small diameter of mandrel

図 1 実験装置の模式図

と第2拡張部(II)の2段階で試料内径を拡張するようにした二段充てん法のマンドレルである。第2拡張部のベアリング部の歯はD-D断面に示すように対象歯車の歯みぞの形状を有している。第1拡張部はE-E断面に示すようにモジュール、歯数は同じであるがその歯先は第2拡張部の歯先より1モジュール低いところに設定し、これを基準として歯たけ h_1 だけ切込んだ負の転位をした歯車となっている。このマンドレル拡張部分の写真を図3に示す。

モジュール $m=1.0$ の場合は第1拡張部の歯たけ h_1 を1.0モジュールから0.25モジュール間隔に2.0モジュールまで5種類とした。その他の場合は1段目の歯たけ $h_1=2.0$ モジュールのみとした。

これに対して、比較のため、試料の内径を連続的に(段階的でなく)拡張させるようにした実験も行った。この実験に用いたマンドレル形状を図4に示す。以後この場合を一回拡張法と呼ぶことにする。

実験は、容量294 kN および1.96 MN の圧縮試験機を用いパンチ降下速度は4 mm/min 程度の低速で行った。

2・2 試料 実験に用いた試料の材質は、成形後

D-D, E-E Cross section

図 2 マンドレルの模式図(I : 第1拡張部, II : 第2拡張部)

図 3 マンドレルの拡張部の写真

図 4 一回拡張用マンドレルの寸法形状

に浸炭焼入れして使用する低炭素鋼 S 15 C, 合金鋼 SCM 415 および全面焼入れ焼戻し, あるいは高周波焼入れを施す中炭素鋼 S 45 C の3種類である。比較のために A 1200 のアルミニウム試料も用いた。これらの機械的性質を表2に示す。

試料の寸法形状を図5に示す。これらは、丸棒素材から機械加工により、円筒形状とし、これにボンダライト・ボンダリユーベの被膜処理を施した。実験に際しては、さらにこの上にジョンソンワックス JP 103 を薄く塗布した。この状態での定せん断摩擦係数の値は0.13程度であった。アルミニウムにはアルボンド A・ボンダリユーベの被膜処理を施した。

成形した内歯車は寸法を測定した後、軸直角または含軸断面で切断し、成形状態や材料流動およびクラック等の有無を顕微鏡、投影器で調べ、また硬さ分布をマイクロビッカース硬さ試験機で測定した。

表 2 素材の機械的性質

	F value MPa	n value	Hardness Hv	$\bar{\sigma}$ MPa
S15C	715	0.215	117	560.9
SCM415	846	0.206	146	686.0
S45C	940	0.185	172	804.0
A1200	145	0.246	27	114.0

図 5 試料の寸法形状

3. 実験結果および検討

3.1 二段充てん法 図4に示したマンドレルで成形した一回拡張でのアルミニウム試料の結果を表3に示す。三種類のコンテナ径いずれの場合にも、歯底部分まで素材が完全に流動していなかった。そこで、実際に成形された歯の高さ h' に対して、目標とした歯の高さ h との比、

$$A = (h'/h)100 \%$$

を充てん状態の尺度とした。すなわち、 A は半径方向の充てん状態の尺度を示す。以下これを成形度 (Formability Index) と呼ぶ。表3のように、1回だけの内径拡張では、いずれの場合にも、成形度は、100%に達していない。しかし、コンテナ径 D_c が小さい場合ほど成形度の値が大きくなっていることから、コンテナ径をさらに小さくして断面減少率を上げれば、充てんした成形品が得られるかもしれない。

これに対して、図2のマンドレルを用いて、内径を2段階で拡張させる二段充てん法では、表3に示した D_c の異なるいずれの場合であっても、充てんした歯部分をもつ成形品が得られた。一回拡張法と同じ断面減少率であっても、充てんした成形品が得られ、二段充てん法の有利な点が明らかである。

二段充てん法の荷重行程曲線の一例を図6に示す。比較のために示した一回拡張法の場合(破線)には行程初期に高い荷重となっている。これは一気に対象とした成形品まで拡張したためである。これに対し二段充てん法では第1拡張部(図中I)での荷重が低くなって

表 3 一回拡張での成形状態

D_c mm	A %	$\sigma_p/\bar{\sigma}$
26	76.5	0.769
28	63.5	0.495
32	61.0	0.246

($m=1.0$ mm A1200
 $ds=12$ mm $dL=17$ mm)

図 6 荷重行程曲線(S15C)

いる。マンドレル小径 ds よりも1段めの歯底円が大きい場合は、素材が第1拡張部でマンドレルにより広げられる。行程が進むと素材は、軸方向だけの流れではなくマンドレル歯先の中央を分水嶺として円周方向へも流れ、歯みぞ部分に流動する。小径 ds より歯底円が小さい場合には、行程の初期からマンドレルの歯によって排除された材料は歯みぞ底部に流動して行く。1回だけの拡張で成形する場合に比して歯みぞ部分が広く大きいために素材が流動しやすく、1段めの荷重は低い。第1拡張部で歯みぞに流動した素材を、第2拡張部(II)で、目的とする歯形まで拡張することになるがこの第2拡張部では試料と型との接触面積が増大するために荷重は急激に上昇し、一回だけの拡張よりも高い値となる。最終的には同じ断面減少率でも1回だけの拡張に比して、充てんしやすくなったのはこのためと考えられる。

成形品の写真を図7に示す。長手方向の充てんの状態を模式的に描くと図8のようになる。図中 X , Y , X' の範囲は所定の歯だけに成形されない歯部分である。以後これらを未充てん長さと呼ぶことにする。また内径を拡張する成形のため先行試料の前方端面部分で a だけ、後方端面部分で b だけ端面の中央部近傍で膨らみができる。また、 b に対応して、後続試料の前方端面部分では、 c だけ凹みが生ずる。以後これらを端面凹凸と呼ぶことにし、成形状態の指標とした。

3.2 マンドレル第1拡張部歯だけ hl の影響

第1拡張部の歯だけを増加させた場合の成形荷重は歯

図7 成形品の写真($m=1.75$ mm, S15C)

図8 成形品含軸断面模式図

たけとともにわずかに大きくなる程度であった。これは歯たけ $h1$ が異なっても、最終的な断面減少率が同じであるためと考えられる。

歯たけ $h1$ に伴う成形状態の変化のようすの一例を図9に示す。図9(a)のように、コンテナ径 Dc が24 mmの場合、歯たけが1.25 mm以上で成形度が100%となっており、半径方向には十分充てんしていることがわかる。また軸方向の未充てん長さは、歯たけ $h1$ の高いものほど小さくなり1段めの歯たけ $h1$ が大きいものほど成形状態が良好となる。図中の r は断面減少率を示す。

一方、試料端面凹凸は、図9(b)のように、 $h1$ による系統的な影響はみられず b, c の値は、1.5~2.4 mm程度の値である。

3・3 コンテナ径 Dc の影響 マンドレルの形状を一定とし、コンテナ径を変化させた実験結果では、コンテナ径が小さいものほど荷重が高くなっていた。マンドレルが一定であるから、コンテナ径が小さくなると断面減少率は大きくなり、これとともに荷重が増加したことになる。

この場合の成形品の写真を図10に示す(図中 r は断面減少率を示す)。肉厚が薄いものから厚いものまで良好なる成形品が得られている。また、成形状態を図11に示す。図11(a)よりコンテナ径の減少、すなわち、

(a) 1段めの歯たけと成形状態

(b) 1段めの歯たけと端面凹凸

図9 1段めの歯たけの成形に及ぼす影響(S15C)

$r=19.5\%$	15.8%	13.1%	11.1%	9.5%
$Dc=24$ mm	26 mm	28 mm	30 mm	32 mm

図10 コンテナ径を変化した成形品の写真(S15C)

断面減少率の増加とともに、未充てん長さが減少するようであり、高い荷重が成形に寄与したものと考えられる。また、端面凹凸 a, b および c をコンテナ径(断面減少率)との関係として示すと図11(b)のようになる。コンテナ径が小さい場合(断面減少率が大)ほど、端面凹凸は小さくなっている。マンドレルによる拡張

(a) コンテナ径と成形状態

(b) コンテナ径と端面凹凸

図 11 コンテナ径の成形に及ぼす影響(S 15 C)

では、試料素材が、まず半径方向外向きに流動する。断面減少率が大きい場合には、この流れはコンテナ壁で拘束され、軸方向の流れとなる。したがって、試料全体が軸方向に伸びる変形をする。これに対してコンテナ径が大きい(断面減少率が小さい)場合には、マンドレルにより広げられた素材の流れは中央部分に限定され、コンテナ壁すなわち試料外周部の変化は小さくなる。結果として中央部分との差が大きくなったものと考えられる。

成形荷重の最大値をパンチおよびマンドレルの投影面積で除したパンチ面圧 σ_p およびマンドレル面圧 σ_m で表すと、図 12 のようになる。図中、中実印は充てんした成形品が得られたことを示し、白ぬきの印は充てんしなかったことを示している。したがって図 12(a) では、破線より左側では充てんした成形品が得

(a) 1 段め歯たけとパンチ面圧

(b) 1 段め歯たけとマンドレル面圧

図 12 1 段め歯たけと成形面圧(S 15 C)

られなかったことになる。1 段めの歯たけを大きくしても、パンチ面圧には大きな相違はなく、面圧はコンテナ径によってほぼ決まった値となっている。これは最終的な断面減少率(図中括弧内の値で示す)が同じためであろう。このように面圧は同じであっても、 h_1 を大きくすることによって充てんすることになることから、1 段めの歯たけ h_1 の値の設定が大切である。

断面減少率 r が約 10% から 20% の間で充てんした成形品の得られる面圧は、最大 750 MPa、最低 300 MPa であった。これらの成形面圧はダイス鋼や高速度鋼等の型強度から見れば十分に低い値で、二段充てん法の効用が推察される。

マンドレル面圧は、図 12(b) のように、1 段めの歯たけが大きいものほど高い面圧を示した。これはマンドレルと試料の接触面積が増大したためと思われる。

表 4 モジュールと成形面圧 ($D_c=32$ mm S 15 C)

m	mm	1.0	1.25	1.50	1.75
σ_p	MPa	285.0	440.3	907.1	762.3
r	%	9.5	20.4	21.9	15.1

図 13 拘束長さと成形状態 (A 1200)

この面圧もパンチ面圧同様に型材質の強度に比して十分に低い値である。

3・4 モジュールを変化させた場合 3・3節まではモジュール 1.0 の内歯車での結果であるが、1.25, 1.5 および 1.75 の場合についても実験を行った。この場合の成形面圧を表 4 に示す。 $m=1.5$ の場合、歯だけは 2.25 モジュールの並歯とした。それぞれ条件が異なるために一概に比較はできないが $m=1.0$ の場合と同様に、低い面圧で充てんした成形品が得られた。

3・5 拘束長さ H の影響 図 1 に示したように、試料がコンテナとマンドレル間で、拘束され、この間で材料が所要の歯の形状に成形される。この拘束長さ H の影響を調べた結果を図 13 に示す。実験の範囲内ではすべての H に対して、成形度 100%, また、未充てん長さ X' および Y はともに零となっていた。

なお、行程初期の荷重には、拘束長さ H の影響はほとんど見られなかったが、 H を長くすると試料と型との間の摩擦が増加し、後半以降の行程での荷重が大きくなっていった。高い荷重は成形に寄与するはずであるから、一般に拘束長さを長くすれば成形状態は改善するものと考えられる。ただし、マンドレルおよびパンチに負荷される面圧は高くなり、型の負担が大きくなる。この意味で、拘束長さに最適値が存在すると思われる。なお、図 13 以外の結果は、すべて拘束長さ H の値は 5 mm と一定にした場合のものである。

3・6 連続成形 二段充てん法による内歯車の連

m=1.75mm Z=11 $D_c=32$ mm

図 14 連続成形の成形品の写真 (S 15 C)

図 15 材質の相違による成形状態

続成形の可能性について検討した。すなわち、試料の長さを種々変化させて連続的に押し出し成形を行った。このときの、成形荷重は、試料を挿入したとき、一時的に多少の荷重の上昇が見られたが、全体としてほぼ一定の荷重で成形されていた。また、成形状態は、先行試料のみ未充てん部 X が見られたが、後続試料群では未充てん長さ X' や Y が見られず満足すべき成形が行われた。成形品の写真の一例を図 14 に示す。

3・7 試料材質の影響 試料材質を変えて成形を行った結果の一例を図 15 に示す。 $D_c=32$ mm, $m=1.0$, $h_1=2.0$ mm の場合についての結果である。当然のことながら変形抵抗の大きい材質程高い面圧を示した。すなわち、パンチ面圧 σ_p は S 15 C, SCM 415 および S 45 C の順にそれぞれ 285 MPa, 326 および 411 MPa であった。しかしいずれの場合にも、平均変形抵抗 $\bar{\sigma}$ の約半分と低い値であった。成形状態はほとんど同じであった。したがって、多くの構造用鋼材を用いて、二段充てん法により内歯車の成形が可能であると考えられる。

4. ま と め

円筒試料の内径をマンドレルで段階的に拡張させる

二段充てん法により、鋼製の内歯車を成形することができた。この方法によればマンドレルやパンチにかかる面圧を低く抑え、かつ十分充てんされた成成品が得られること並びに連続成形が可能である。

なお、マンドレルの形状としては、1段めの歯だけが成形に及ぼす影響が大きく、この値の大きいほうが充てんされやすいことが明らかにされた。

実験に協力された当時静岡大学工学部卒業研究生であった上田忠史(現；トヨタ車体)、中井勝章(現；日本車両)の両君、並びに型や試料の製作に協力いた

いた静岡大学工作技術センターの河合朝雄係長はじめ松野貞雄、佐原和芳、岡本哲幸、神尾恒春、福田聡の諸氏に深く感謝致します。また S 15 C 鋼素材は、川崎製鉄(株)より提供されたことを記し、感謝する。

文 献

- (1) 泉澤・ほか2名, 塑性と加工, 32-367(1991), 982.
- (2) 泉澤・ほか2名, 機講論, No. 883-2(1988-7), 146.
- (3) 泉澤・ほか2名, 平元春塑加講論, (1989), 511.
- (4) 泉澤・ほか3名, 平元春塑加講論, (1989), 515.
- (5) 泉澤・ほか3名, 機講論, No. 893-1(1989-3), 186.